

ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ Η' ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΕΛΑΣΜΑΤΑ (ΕΠΙΚΟΛΛΗΤΑ Η' ΜΕΣΑ ΣΕ ΑΥΛΑΚΙΑ)

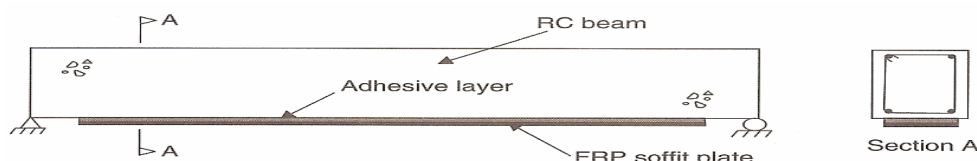
ΚΟΥΝΤΕΜΑΝΗ ΑΣΗΜΙΝΑ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως θέμα τη χρήση σύνθετων υλικών (FRP-Fiber Reinforced Polymers) ή χαλύβδινων ελασμάτων (επικολλητών ή μέσα σε αυλάκια) για την καμπτική ενίσχυση δοκών. Η εργασία περιλαμβάνει τα γενικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των χαλύβδινων ελασμάτων, των ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ) και των τριών τύπων ινών τους, (ΙΟΠ-άνθρακα, ΙΟΠ-αραμιδή και ΙΟΠ-γυαλί), καθώς και αξιολόγηση των τύπων αυτών. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εφαρμογής των δύο μεθόδων, οι τρόποι αστοχίας της ενισχυμένης με χαλύβδινα ελάσματα και σύνθετα υλικά δοκού και γίνεται αναφορά στους τρόπους και τη σημασία αγκύρωσης τους. Τέλος, παρουσιάζεται η εναλλακτική μέθοδος τοποθέτησης των ελασμάτων στη δοκό, μέσα σε 'αυλάκια'.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χειροτέρευση της κατάστασης των ήδη υπάρχουσων κατασκευών από διάφορους παράγοντες (σεισμός, πυρκαγιά, κακοτεχνίες κ.α) έχει οδηγήσει στην ανάγκη επισκευής και ενίσχυσης αυτών. Η ανάπτυξη μεθόδων ενίσχυσης κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι λοιπόν αναγκαία αφού η αντικατάστασή τους από νέες κατασκευές καθίσταται απαγορευτική, ή τουλάχιστον στις περισσότερες περιπτώσεις δύσκολη, λόγω του μεγάλου κόστους μιας τέτοιας ενέργειας [13]. Η χρήση των εξωτερικών ενισχύσεων είναι μια αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα αυτό και συνίσταται στην επικόλληση φύλλων χάλυβα στην επιφάνεια του σκυροδέματος [4]. Μια βελτίωση της μεθόδου αυτής είναι η αντικατάσταση των χαλύβδινων ελασμάτων από ινοπλισμένα πολυμερή σε μορφή ελασμάτων ή υφασμάτων, που για την καμπτική ενίσχυση μιας δοκού, για παράδειγμα, τοποθετούνται στο εφελκυόμενο πέλαμα της (Σχήμα 1) [8]. Εναλλαγή της μεθόδου είναι η τοποθέτηση των φύλλων αυτών σε 'αυλάκια' (εγχοπές) στη δοκό.



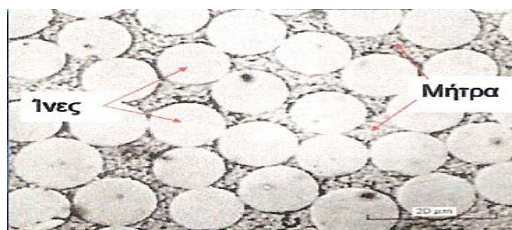
Σχήμα 1 : Ενισχυμένη Δοκός με Φύλλο FRP [6]

2. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ FRP

Για την ενίσχυση σε κάμψη δοκών χρησιμοποιούνται χαλύβδινα ελάσματα πάχους συνήθως 1-1,5 mm με όριο διαρροής που κυμαίνεται από 240 έως 400 MPa. Τα ελάσματα επικολλούνται σε μία ή περισσότερες στρώσεις σε συνεχή σύνδεση χρησιμοποιώντας ειδική κόλλα που συνήθως είναι εποξειδική. Το πάχος των ελασμάτων πρέπει να είναι μικρό για να αποφεύγεται η πρόωρη αστοχία στη διεπιφάνεια επικόλλησης του ελάσματος. Γενικά συνίσταται να μην ξεπερνά τα 4mm και επίσης να είναι μικρότερο του 2% του πλάτους του ελάσματος [1].

Όσον αφορά τα ινοπλισμένα πολυμερή μπορεί να είναι προκατασκευασμένα ή μπορεί να κατασκευάζονται επί τόπου του έργου [6]. Οι ιδιότητες τους προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των διακριτών συστατικών τους υλικών, δηλαδή των ινών (ίνες άνθρακα, αραμιδίου ή γυαλιού) και της μήτρας [5], ρητίνη, συνήθως εποξειδική (Σχήμα 2). Τα σύνθετα

αυτά υλικά διατίθενται σε μορφή σχετικά δύσκαμπτων «λωρίδων» πάχους της τάξης του 1 mm ή εύκαμπτων «υφασμάτων» (Σχήμα 3) πάχους της τάξης του 0.1-0.4 mm με ίνες σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις [2]. Τυπικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της παραμόρφωσης αστοχίας των ινών και του χάλυβα δίνονται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 2: Διακριτά Συστατικά Υλικά Ινοπλισμένων Πολυμερών, Ίνες και Μήτρα [14]



Σχήμα 3 : Ίνες Άνθρακα, Αραμιδίου, Γυαλιού και Γυαλιού / Αραμιδίου [14]

Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Παραμόρφωση Αστοχίας (%)
Σύνθετο Υλικό με Ίνες Γυαλιού	50	3%
Σύνθετο Υλικό με Ίνες Αραμιδίου	65-120	2-3%
Σύνθετο Υλικό με Ίνες Άνθρακα	35-190	1-1,5%
Χάλυβας	200	10%

Πίνακας 1 : Τυπικές Τιμές Μέτρου Ελαστικότητας και Παραμόρφωσης Αστοχίας Σύνθετων Υλικών και Χάλυβα [1]

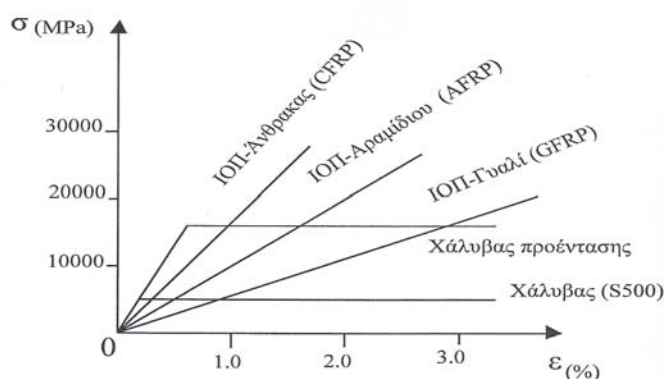
3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΡΙΩΝ ΤΥΠΩΝ ΙΝΩΝ FRP (ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ, ΓΥΑΛΙΟΥ, ΚΑΙ ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ) ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥΣ

Η αντικατάσταση των χαλύβδινων ελασμάτων με ινοπλισμένα πολυμερή συζητήθηκε στα Ελβετικά Ομοσπονδιακά Εργαστήρια για Δοκιμές Υλικών και Έρευνα (EMPA) το 1982 και μία από τις σημαντικότερες αποφάσεις που έπρεπε να ληφθεί σχετιζόταν με τον καταλληλότερο τύπο ινών FRP για την εφαρμογή αυτή. Ο Πίνακας 2 παραθέτει κριτήρια που σχετίζονται με την χρήση των σύνθετων υλικών ως υλικά για την ενίσχυση κατασκευών και το Σχήμα 4 δείχνει γραφικά τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης για τους τρεις τύπους ινών.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΙΟΠ-ΑΝΘΡΑΚΑ	ΙΟΠ-ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ	ΙΟΠ-ΓΥΑΛΙΟΥ
Εφελκυστική Αντοχή	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή
Θλιπτική Αντοχή	Πολύ καλή	Μη ικανοποιητική	Καλή
Μέτρο Ελαστικότητας	Πολύ καλή	Καλή	Ικανοποιητική

Συμπεριφορά σε Μακροχρόνιες Δράσεις	Πολύ καλή	Καλή	Ικανοποιητική
Συμπεριφορά Κόπωσης	Εξαιρετική	Καλή	Ικανοποιητική
Πυκνότητα	Καλή	Εξαιρετική	Ικανοποιητική
Ανθεκτικότητα σε Αλκάλια	Πολύ καλή	Καλή	Μη ικανοποιητική
Τιμή	Ικανοποιητική	Ικανοποιητική	Πολύ καλή

Πίνακας 2 : Ποιοτική Σύγκριση μεταξύ ΙΟΠ-Άνθρακα, ΙΟΠ-Αραμιδίου και ΙΟΠ-Γυαλιού [9]



Σχήμα 4 : Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για Άνθρακα, Αραμίδιο, Γυαλί και Χάλυβα [1]

Το 1982 ο U.Meier έπρεπε να επιλέξει έναν τύπο ινών στον οποίο θα συγκέντρωνε την έρευνα του. Από πλευρά οικονομίας μια περιληπτική μελέτη θα μπορούσε να επιχειρηθεί για ένα υλικό. Τα κριτήρια ήταν αυτά που φαίνονται στον Πίνακα 2, η εξαιρετική τεχνική δυνατότητα των ινών άνθρακα καθώς και η ευνοϊκή τιμή, όπως προβλεπόταν, και σε κάποιο σημείο, επιτεύχθηκε από τους κατασκευαστές.

Τα στοιχεία στον Πίνακα 2 είναι μάλλον πολύ γενικά. Ωστόσο, είναι ξεκάθαρο ότι η εφελκυστική αντοχή είναι ένα σχετικό κριτήριο, αλλά η σημασία της θλιπτικής αντοχής μπορεί να προβληματίσει, αφού το σκυρόδεμα γενικά πρέπει να ενισχυθεί στην εφελκυστική πλευρά της δοκού. Σε μερικά στατικά συστήματα, ωστόσο, μπορεί να υπάρχουν περιοχές που κανονικά φορτίζονται σε εφελκυσμό αλλά οι οποίες μπορεί να υποστούν θλιπτικές τάσεις ανάλογα με την κατανομή του φορτίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα χαλύβδινα ελάσματα δεν είναι αποδεκτά αφού θα αποκολληθούν. Τα ΙΟΠ-Αραμιδίου θα αστοχούσαν λόγω της χαμηλής θλιπτικής αντοχής. Ο Deuring απέδειξε ότι τα ΙΟΠ-Άνθρακα ικανοποιούν την απαίτηση θλίψης.

Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού είναι μεγάλης σημασίας όταν το φύλλο FRP δεν είναι προεντεταμένο πριν την τοποθέτησή του, γιατί μόνο τα δύσκαμπτα ελάσματα μπορούν να ανακουφίσουν τον υπάρχοντα εσωτερικό οπλισμό από τις τάσεις. Τα ελάσματα από ίνες γυαλιού πρέπει να είναι 4-10 φορές παχύτερα από τα ελάσματα άνθρακα για να φτάσουν την ίδια εφελκυστική δυσκαμψία. Αν τα ΙΟΠ-Γυαλιού έχουν μήκος μεγαλύτερο από 6-10 m η διακίνηση τους στον τόπο της κατασκευής είναι δύσκολη.

Η συμπεριφορά κόπωσης του συστήματος μπορεί να είναι σημαντική ή ασήμαντη ανάλογα με την κατασκευή και τη φύση του φορτίου. Η πυκνότητα του υλικού δεν είναι σημαντικό κριτήριο αφού η πυκνότητα όλων των τύπων ινών είναι χαμηλή συγκριτικά με τον χάλυβα.

Το κριτήριο του κόστους είναι πολύ σημαντικό. Αν γίνει μια σύγκριση της τιμής των σύνθετων υλικών με την τιμή του χάλυβα θα φανεί σε πρώτη ματιά ότι τα σύνθετα υλικά είναι πολύ πιο ακριβά. Αν όμως συνυπολογιστεί η ευκολία χειρισμού τους και τα άλλα πλεονεκτήματα τους, η λύση αυτή γίνεται ανταγωνιστική.

Από τις παραπάνω θεωρήσεις προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με την αξιολόγηση των υλικών :

1. Για εφαρμογές στις οποίες η διάβρωση δεν παίζει κανέναν ρόλο και το μήκος του προς ενίσχυση στοιχείου είναι μικρότερο από 5m, ο χάλυβας είναι υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αυτή είναι περίπτωση κυρίως για τις κατασκευές κτιρίων.
2. Σε εφαρμογές που η διάβρωση, το μήκος του προς ενίσχυση στοιχείου και ο χειρισμός στον τόπο του έργου παίζουν σημαντικό ρόλο, για παράδειγμα, σε γέφυρες, σε πολυώροφους χώρους στάθμευσης, σε σιδηροδρομικούς σταθμούς και σε ειδικές βιομηχανικές κατασκευές, η χρήση σύνθετων υλικών πρέπει να εξετάζεται σοβαρά.

Τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 2 δείχνουν ξεκάθαρα ότι τα ΙΟΠ-Άνθρακα ικανοποιούν περισσότερο τις απαιτήσεις για ενίσχυση των κατασκευών [9].

4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑΙΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Όπως όλα τα προβλήματα που υπάρχουν στις κατασκευές, έτσι και το πρόβλημα καμπτικής ενίσχυσης των δοκών έχει όπως προαναφέρθηκε περισσότερες από μία λύσεις. Η τελική απόφαση για το ποια λύση είναι η καταλληλότερη εξαρτάται όχι μόνο από τον οικονομικό παράγοντα αλλά και από τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των εναλλακτικών λύσεων. Απαραίτητη είναι λοιπόν μια τέτοια σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων ενίσχυσης, η οποία γίνεται παρακάτω [7].

4.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΧΑΛΥΒΑΙΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Αντοχή: Η τελική αντοχή των FRP μπορεί να ποικίλει, ανάλογα με την αναλογία ινών που έχουν, αλλά για θέματα ενίσχυσης η τελική αντοχή μπορεί να είναι τουλάχιστον 3 φορές μεγαλύτερη από την τελική αντοχή του χάλυβα .

Βάρος : η πυκνότητα των FRP είναι μόνο 20% της πυκνότητας του χάλυβα. Έτσι, μπορεί να έχουν λιγότερο από 10% του βάρους του χάλυβα της ίδιας τελικής αντοχής, γεγονός που διευκολύνει τη μεταφορά τους και φυσικά την τοποθέτηση τους, μειώνοντας το χρόνο που απαιτείται για αυτήν.

Μήκος : τα χαλύβδινα ελάσματα έχουν περιορισμένο μήκος (σπάνια ξεπερνούν τα 6-8 m) [9] και πιθανόν να χρειάζεται ένωση αυτών, ενώ τα σύνθετα υλικά έχουν απεριόριστο μήκος,

Διάρκεια : στα χαλύβδινα ελάσματα υπάρχει η πιθανότητα διάβρωσης. Το πρόβλημα αυτό δεν υπάρχει στα σύνθετα υλικά.

Συντήρηση της ενίσχυσης : τα χαλύβδινα ελάσματα απαιτούν συντήρηση στο βάψιμο, γεγονός που προκαλεί αναστάτωση στους χρήστες της κατασκευής καθώς και επιπλέον έξοδα. Τα FRP δεν απαιτούν τέτοια συντήρηση, μειώνοντας έτσι το κόστος ζωής της μεθόδου.

Επισκευή κατεστραμμένης ενίσχυσης : η επισκευή ενός φύλλου FRP μπορεί να γίνει ευκολότερα από αυτήν ενός χαλύβδινου ελάσματος. Ένα χαλύβδινο έλασμα μπορεί να υποστεί κάποια εκτεταμένη καταστροφή από κρούση κι έτσι να είναι απαραίτητη η πλήρης απομάκρυνση και αντικατάσταση του. Με τα FRP είναι πιθανότερο η βλάβη να είναι τοπική αφού είναι λεπτότερα και πιο εύκαμπτα. [7]

4.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Κόστος : τα FRP είναι ακριβότερα από τα χαλύβδινα φύλλα. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ των δύο υλικών τείνει να μειωθεί καθώς το μέγεθος της παραγωγής και ο ανταγωνισμός μεταξύ των κατασκευαστών μεγαλώνουν [7].

Συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες : τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν χαμηλή αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ρητίνη καίγεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 250°C [1].

Ανθεκτικότητα σε διάρκεια : τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν αμφισβητούμενη ανθεκτικότητα σε διάρκεια. Είναι ευαίσθητα σε περιβαλλοντικές δράσεις όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, η υγρασία, οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και η δράση χημικών. Σε γενικές γραμμές η παραπάνω ευαισθησία εξαρτάται από τον τύπο των ινών του υλικού. Τα υλικά με ίνες άνθρακα θεωρούνται περισσότερο ανθεκτικά, ενώ τα υλικά με ίνες γυαλιού είναι τα λιγότερο ανθεκτικά και τα υλικά με ίνες αραμιδίου βρίσκονται ενδιάμεσα [1].

Πλαστικότητα : τα ινοπλισμένα πλαστικά έχουν έλλειψη πλαστικότητας, η οποία μπορεί έως ένα βαθμό να αναπληρωθεί από τη χρήση διαφορετικού τύπου ινών στο ίδιο στοιχείο, οι οποίες, αστοχώντας σε διαφορετικές παραμορφώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε μια ψευδοπλαστική συμπεριφορά [3].

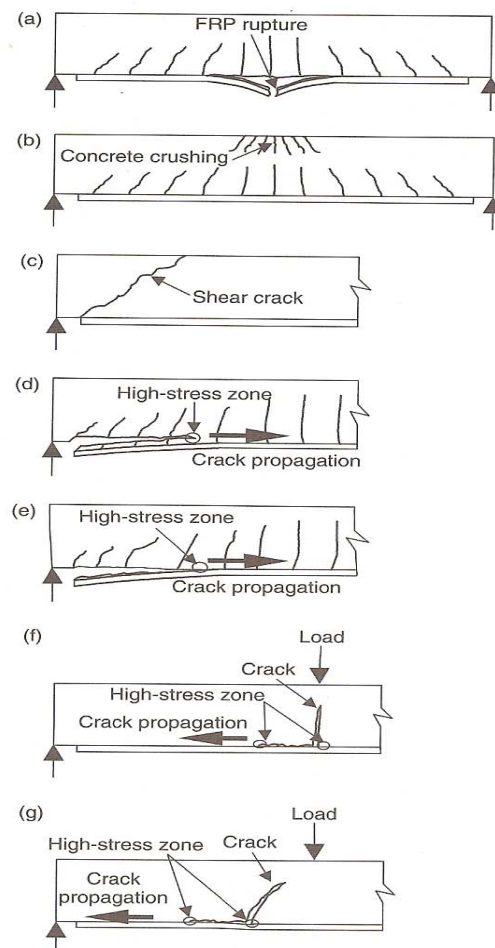
ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ	ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΛΑΣΜΑΤΑ
Ίδιο Βάρος	Χαμηλό	Υψηλό
Εφελκυστική Αντοχή	Πολύ υψηλή	Υψηλή
Συνολικό Πάχος	Πολύ Μικρό	Μικρό
Διάβρωση	Καμία	Ναι
Μήκος	Οποιοδήποτε	Περιορισμένο
Ευκολία	Εύκολο και εύκαμπτο	Δύσκολο και δύσκαμπτο
Ανάληψη Φορτίου	Μόνο κατά μήκος	Σε οποιαδήποτε διεύθυνση
Επικαλύψεις	Εύκολο	Σύνθετο
Κόπωση	Εξαιρετική	Ικανοποιητική
Δαπάνη Υλικού	Υψηλή	Χαμηλή
Δαπάνη τοποθέτησης	Χαμηλή	Υψηλή
Εφαρμογή	Χωρίς εργαλεία	Αναρτήσεις και συσφίξεις

Πίνακας 3 : Ιδιότητες Ινοπλισμένων Πολυμερών και Μεταλλικών Ελασμάτων [15]

5. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΜΕ FRP ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΔΟΚΟΥ

5.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Μια σχηματική παράσταση των τυπικών τρόπων αστοχίας φαίνεται στο Σχήμα 5. Οι τρόποι αστοχίας είναι ταξινομημένοι σε επτά κύριες κατηγορίες στο σχήμα και ορίζονται ως εξής : 1) καμπτική αστοχία με θραύση του φύλλου FRP, 2) καμπτική αστοχία με θραύση του θλιβόμενου σκυροδέματος, 3) διατμητική αστοχία, 4) αποκόλληση της επικάλυψης σκυροδέματος, 5) αποκόλληση του άκρου του φύλλου FRP στη διεπιφάνεια συγκολλητικής στρώσης-σκυροδέματος, 6) ενδιάμεση καμπτική ρωγμή-πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης και 7) ενδιάμεση καμπτοδιατμητική ρωγμή-πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης. Συλλογικά, οι τρόποι αστοχίας 4 και 5 αναφέρονται ως αστοχίες με αποκόλληση της απόληξης του στοιχείου ενίσχυσης, ενώ οι τρόποι αστοχίας 6 και 7 αναφέρονται ως ενδιάμεσες ρωγμές- πρόκληση αποκόλλησης στη διεπιφάνεια δοκού-φύλλου [6].



Σχήμα 5 : Τρόποι Αστοχίας Ενισχυμένης με FRP Δοκού Ο.Σ [6]

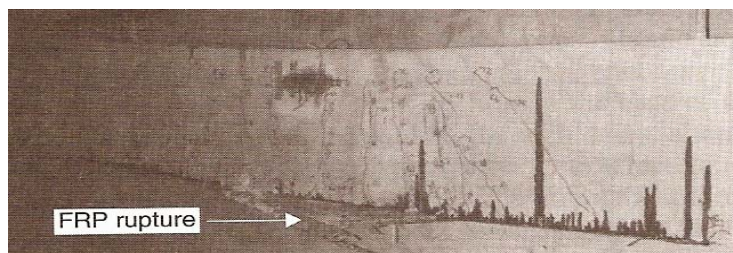
Όλοι οι παραπάνω τρόποι αστοχίας, με εξαίρεση την ενδιάμεση ρωγμή και πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης με μια μεγάλης διάρκειας διαδικασία προώθησης της αποκόλλησης, συμβαίνουν με ψαθυρό τρόπο. Συγκεκριμένα, η αποκόλληση του φύλλου στο άκρο συμβαίνει δίνοντας μικρή ή καμία ένδειξη αστοχίας. Εάν ένας τρόπος αστοχίας είναι κρίσιμος εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως η ποσότητα του εσωτερικού οπλισμού κάμψης και διάτμησης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των υλικών των FRP και το συγκολλητικό στρώμα [6]

5.2 ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΣΤΟΧΙΑ

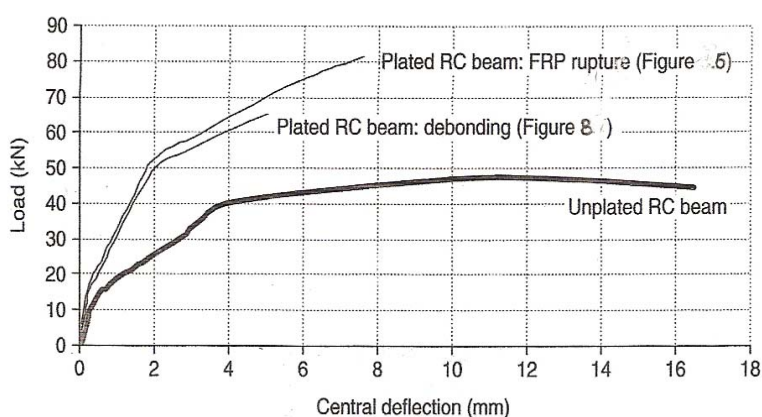
Αν το φύλλο FRP έχει αγκυρωθεί κατάλληλα στα άκρα του, η δοκός θα φτάσει την τελική καμπτική της αντοχή όταν είτε αστοχήσει το φύλλο σε εφελκυστική θραύση (Σχήμα 5a και 6) είτε αστοχήσει το θλιβόμενο σκυρόδεμα (Σχήμα 5b). Η θραύση του FRP γενικά συμβαίνει μετά τη διαρροή των διαμηκών χαλύβδινων ράβδων, παρόλο που η διαρροή του χάλυβα μπορεί να μην έχει συμβεί αν οι ράβδοι είναι τοποθετημένες αρκετά μακριά από το εφελκυσμένο πέλμα της δοκού.

Το Σχήμα 7 δείχνει μια τυπική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης στο μέσο του ανοίγματος μιας απλά εδραζόμενης δοκού ενισχυμένης με FRP (Hau 1999). Για αυτήν τη συγκεκριμένη δοκό, το φύλλο κατέληγε πολύ κοντά στη στήριξη και δε συνέβη πρόωρη αποκόλληση. Αντί αυτού, η δοκός αστόχησε από θραύση του ίδιου του υλικού ενίσχυσης. Συγκριτικά με την αντίστοιχη απόκριση μιας μη ενισχυμένης δοκού (Σχήμα 7), η ενισχυμένη δοκός είχε 76% κέρδος σε αντοχή, αλλά έδειξε πολύ μειωμένη ολκιμότητα. Η αύξηση της

αντοχής και η μείωση της ολκιμότητας είναι δύο κύριες συνέπειες της ενίσχυσης μιας δοκού με FRP. Οι δοκοί που αστοχούν λόγω θραύσης του σκυροδέματος όταν χρησιμοποιείται μεγάλη ποσότητα FRP δείχνουν επίσης πολύ μειωμένη ολκιμότητα (Buyukozturk and Hearing 1998) [6].



Σχήμα 6 : Ενισχυμένη Δοκός με Φύλλο FRP: Θραύση FRP [6]



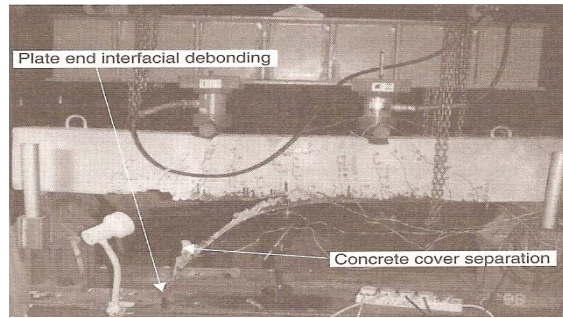
Σχήμα 7 : Καμπύλη Φορτίου-Παραμόρφωσης Ενισχυμένης και μη Ενισχυμένης Δοκού [6]

5.3 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΣΤΟΧΙΑ

Η ενισχυμένη δοκός μπορεί να αστοχήσει ψαθυρά σε διάτμηση όπως φαίνεται στο Σχήμα 5c. Ενώ οι κανονικές δοκοί σχεδιάζονται για να αστοχήσουν σε κάμψη και όχι σε διάτμηση, που είναι ψαθυρός τρόπος αστοχίας, η διατμητική αστοχία μπορεί να γίνει κρίσιμη στην καμπτική ενίσχυση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το φύλλο FRP συνεισφέρει λίγο στη διατμητική αντίσταση. Τότε, πρέπει ταυτόχρονα να γίνει ενίσχυση σε διάτμηση της δοκού για να εξασφαλισθεί ότι η καμπτική αστοχία θα προηγηθεί της διατμητικής. Αυτό είναι το επιθυμητό γιατί μπορεί η καμπτική αστοχία της ενισχυμένης δοκού να είναι ψαθυρή αλλά είναι περισσότερο όλκιμη από τη διατμητική [6].

5.4 ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΤΟΥ ΦΥΛΛΟΥ FRP

Πρόωρη αστοχία μπορεί να συμβεί πριν η δοκός φτάσει την τελική καμπτική αντοχή της λόγω αποκόλλησης. Ο πιο συχνά αναφερόμενος τρόπος αποκόλλησης σε πειραματικές μελέτες είναι η αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος (Σχήμα 5d) που ξεκινά από το άκρο του φύλλου ή κοντά σε αυτό. Λιγότερο συχνή είναι η αποκόλληση του φύλλου FRP από το πέλαμα της δοκού, η οποία επίσης ξεκινά στο άκρο του φύλλου ή κοντά σε αυτό (Σχήμα 5e). Σε πραγματικές δοκούς, οι δυο περιπτώσεις μπορεί να συνυπάρχουν όπως φαίνεται στη δοκό που δοκιμάστηκε από τον Hau (1999) (Σχήμα 8). Στη δοκό αυτή το έλασμα είχε το ίδιο πλάτος και πάχος όπως αυτό στο Σχήμα 6, αλλά το μήκος του ήταν μικρότερο (Hau 1999). Η καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης εμφανίζει μικρή ολκιμότητα (Σχήμα 7), που είναι χαρακτηριστικό για αυτού του είδους τις αστοχίες [6].

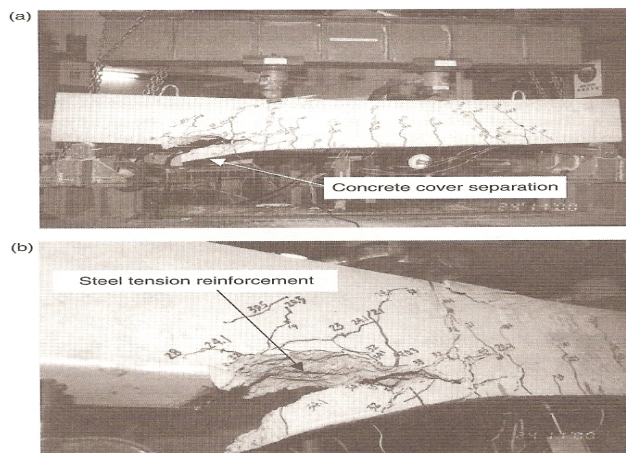


Σχήμα 8 : Ενισχυμένη Δοκός με Φύλλο FRP : Μεικτός Τρόπος Αστοχίας (αποκόλληση του άκρου του φύλλου σε συνδυασμό με διαχωρισμό της επικάλυψης σκυροδέματος) [6]

5.4.1 ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Αυτός είναι ο πιο συχνά αναφερόμενος τρόπος αστοχίας. Γενικά θεωρείται πως ξεκινά με τον σχηματισμό μιας ρωγμής στο άκρο του φύλλου ή κοντά σε αυτό (Σχήμα 9a), εξαιτίας των μεγάλων τιμών των διεπιφανειακών τάσεων στην περιοχή λόγω της απότομης απόληξης του στοιχείου. Η ρωγμή αυτή διαδίδεται στο επίπεδο της εφελκυστικής ενίσχυσης και εξελίσσεται οριζόντια στο επίπεδο των εσωτερικών χαλύβδινων ράβδων (Σχήμα 9b), καταλήγοντας σε αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος (Garden and Hollaway 1998a).

Πειράματα που έγιναν από του Smith και Teng (2001a) έδειξαν ότι όσο η απόληξη του φύλλου ενίσχυσης κινείται πλησιέστερα στη στήριξη, η ρωγμή εκεί γίνεται πιο επικλινή, η αστοχία πιο ψαθυρή και το φορτίο αστοχίας αυξάνεται. Αυτές οι αλλαγές είναι συνέπειες του ότι η διατμητική δύναμη γίνεται σημαντικότερη από τη ροπή κάμψης στην απόληξη του στοιχείου [6].



Σχήμα 9 : Ενισχυμένη Δοκός με Φύλλο FRP, Αποκόλληση της Επικάλυψης Σκυροδέματος [6]

5.4.2 ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΑΚΡΟΥ ΤΟΥ ΦΥΛΛΟΥ FRP ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι ερευνητές συναινούν ότι αστοχίες αυτού του είδους ξεκινούν από υψηλές διεπιφανειακές διατμητικές και ορθές τάσεις κοντά στο άκρο του FRP που ξεπερνούν την αντοχή του πιο αδύναμου υλικού, γενικά του σκυροδέματος. Στην αποκόλληση, πάνω στο φύλλο FRP, παραμένει μια λεπτή στρώση σκυροδέματος κολλημένη (Täljsten 1999), γεγονός που δείχνει ότι η αστοχία γενικά συμβαίνει στο σκυροδέμα στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-συγκολλητικής στρώσης. Ο κίνδυνος εμφάνισης αυτής της μορφής αστοχίας αυξάνεται με τη χρήση κατώτερης ποιότητας συγκολλητικών ουσιών και την ύπαρξη ανώμαλης επιφάνειας σκυροδέματος [6].

5.5 ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΡΩΓΜΗ-ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η αποκόλληση μπορεί να ξεκινήσει από μια καμπτική ή μια καμπτοδιατμητική ρωγή μακριά από το άκρο του φύλλου FRP και μετά να διαδοθεί προς ένα από τα άκρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5f και 5g αντίστοιχα. Τέτοιες μορφές αστοχίας παρατηρούνται σπανιότερα [6].

5.5.1 ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΩΓΜΗ- ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ

Ο μηχανισμός αυτού του είδους αστοχίας περιγράφεται ως εξής: όταν μια μεγάλη ρωγή σχηματίζεται στο σκυρόδεμα, οι εφελκυστικές τάσεις μπορεί να ελευθερωθούν από το ρηγματωμένο σκυρόδεμα και να μεταφερθούν στο φύλλο του FRP. Σαν αποτέλεσμα, δημιουργούνται δίπλα στη ρωγή υψηλές τοπικές τάσεις στη διεπιφάνεια FRP-σκυροδέματος. Καθώς το εφαρμοζόμενο φορτίο αυξάνεται, οι εφελκυστικές τάσεις στο φύλλο και οι τάσεις στη διεπιφάνεια επίσης αυξάνονται. Όταν αυτές οι τάσεις φτάσουν κρίσιμες τιμές, ξεκινά η αποκόλληση στη ρωγή και διαδίδεται προς ένα από τα άκρα, γενικά το κοντινότερο [6].

5.5.2 ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΚΑΜΠΤΟΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΡΩΓΜΗ – ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ

Για αποκόλληση που προκαλείται από καμπτική ρωγή, η διαπλάτυνση της ρωγμής είναι η κινητήρια δύναμη για τη διάδοση της αποκόλλησης. Ωστόσο, σε μια ενδιάμεση καμπτοδιατμητική ρωγή που προκαλεί αποκόλληση, η σχετική κατακόρυφη μετατόπιση μεταξύ των δυο επιφανειών της ρωγμής δημιουργεί τάσεις αποκόλλησης στη διεπιφάνεια FRP-σκυροδέματος. Παρόλα αυτά θεωρείται ότι η διαπλάτυνση της ρωγμής είναι σημαντικότερη, με την σχετική κίνηση της ρωγμής να είναι δευτερεύουσα [6].

5.6 ΑΛΛΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ

5.6.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η επιφάνεια σκυροδέματος πρέπει να είναι σωστά προετοιμασμένη ακολουθώντας την κατάλληλη διαδικασία για να αποφευχθεί η αστοχία στη διεπιφάνεια συγκολλητικού υλικού-σκυροδέματος. Για να επιτευχθεί αυτό είναι να ομαλοποιηθούν οι ανώμαλες επιφάνειες σκυροδέματος (Meier 1995). Όταν ένα λεπτό φύλλο FRP επικολληθεί σε μια ανώμαλη επιφάνεια, υπόκειται σε εφελκυσμό, κατάσταση που οδηγεί στην ανάπτυξη τάσεων αποκόλλησης που μπορεί να οδηγήσουν τελικά στην αποκόλληση στην διεπιφάνεια FRP – σκυροδέματος [6].

5.6.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Ισχυρά συγκολλητικά υλικά έχουν μεγαλύτερη αντοχή από αυτήν του σκυροδέματος, οπότε η αστοχία συγκολλητικού στρώματος είναι σπάνια. Παρόλα αυτά αν τα υλικά αυτά είναι κατώτερης ποιότητας ή δεν εφαρμοστούν σωστά, η αστοχία είναι πιθανή στη διεπιφάνεια κόλλας-σκυροδέματος και στη διεπιφάνεια FRP-κόλλας [6].

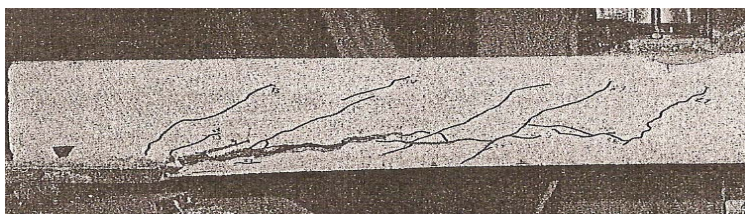
6. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΜΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΕΛΑΣΜΑΤΑ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΔΟΚΟΥ

Στο άκρο του ελάσματος σε μια ενισχυμένη δοκό συγκεντρώνονται τάσεις που προκαλούνται από τη διακοπή του ελάσματος εκεί. Η συγκέντρωση αυτή εξαρτάται όχι μόνο από τις εξωτερικά εφαρμοζόμενες δυνάμεις, αλλά επίσης από: τη συχνά μη γραμμική συμπεριφορά

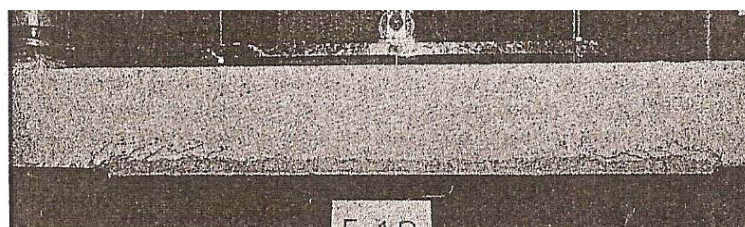
των τριών υλικών, χάλυβα, κόλλας και σκυροδέματος και την επίδραση των καμπτικών ρωγμών στα άκρα του ελάσματος [10].

6.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Σε μια ενισχυμένη με χαλύβδινα ελάσματα δοκό δυο είναι οι διακριτές μορφές αστοχίας: Διατμητική Απόσχιση : προκαλείται από τη δημιουργία διαγώνιων διατμητικών ρωγμών και σχετίζεται με τον γρήγορο διαχωρισμό του ελάσματος από τη δοκό (Σχήμα 10). Καμπτική Απόσχιση: προκαλείται από την αύξηση της καμπυλότητας της δοκού και σχετίζεται με τον σταδιακό διαχωρισμό του ελάσματος από τη δοκό (Σχήμα 11) [10].



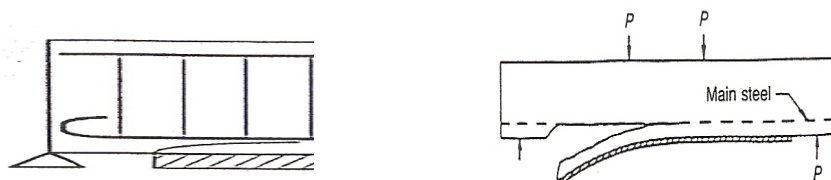
Σχήμα 10 : Διατμητική Απόσχιση [10]



Σχήμα 11 : Καμπτική Απόσχιση [10]

6.2 ΑΛΛΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ

Συστηματικές πειραματικές έρευνες για τους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ενισχυμένων με μεταλλικά ελάσματα δοκών, όπως το πάχος του ελάσματος και του συγκολλητικού στρώματος, έχουν αναφερθεί από τον Swamy et al. Αυτές οι έρευνες δείχνουν ότι η επικόλληση λεπτών χαλύβδινων ελασμάτων στο εφελκόμενο πέλαμα των δοκών μπορεί να οδηγήσει σε μια σημαντική βελτίωση της απόδοσης τους. Ωστόσο, αύξηση του πάχους των ελασμάτων μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία λόγω ρηγμάτωσης της επικάλυψης του σκυροδέματος κατά μήκος του επιπέδου του συμβατικού εσωτερικού οπλισμού ενίσχυσης, στο άκρο του ελάσματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12 [12].



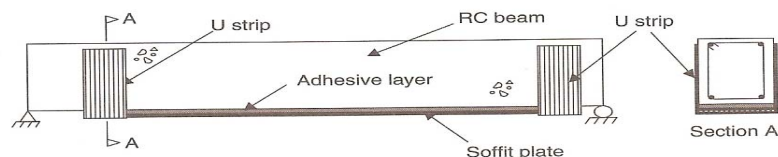
Σχήμα 12 : Αρχή Ρηγμάτωσης και Αστοχία στο Επίπεδο του Εσωτερικού Οπλισμού [11]

7. ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΑΚΡΩΝ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ Ή ΤΟΥ FRP

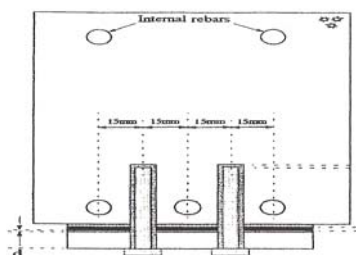
Για να αποτραπεί η αποκόλληση στα άκρα του στοιχείου ενίσχυσης, μπορούν να τοποθετηθούν μηχανικές αγκυρώσεις. Προκατασκευασμένες λωρίδες χάλυβα ή FRP με διατομή U (Σχήμα 13) μπορούν να κολληθούν ή να βιδωθούν (Ritcie et al. 1991, Swamy and Mukhopadhyaya 1999) στα άκρα του ελάσματος. Υπάρχει επίσης και η περίπτωση χρήσης χαλύβδινων κοχλιών για την αγκύρωση των άκρων κατευθείαν στο σκυρόδεμα (Garden and Hollaway 1998a), όπως φαίνεται στο Σχήμα 14 [6].

Η χρήση κοχλιών για την αγκύρωση είναι συνηθέστερη όταν χρησιμοποιούνται χαλύβδινα ελάσματα για την ενίσχυση, για να υπάρχει αντίσταση στις δυνάμεις που τείνουν να αποκολλήσουν το έλασμα από τη δοκό καθώς και για να συγκρατήσει το έλασμα σε περίπτωση που αστοχήσει η συγκολλητική ουσία.

Στην περίπτωση των σύνθετων υλικών η χρήση κοχλιωτών συνδέσεων είναι πιο πολύπλοκη αφού τα ινοπλισμένα υλικά μπορεί να εξασθενίσουν σε μεγαλύτερο βαθμό από την ύπαρξη των οπών. Η εισαγωγή ασυνεχειών μειώνει τη διατομή, μειώνοντας έτσι το φορτίο που απαιτείται για να αστοχήσει το υλικό σε εφελκυσμό. Επίσης, εισάγονται υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων στην περιοχή των ασυνεχειών σαν αποτέλεσμα της ανισοτροπίας του υλικού. Αυτά ενισχύουν τη θραύση [7].



Σχήμα 13 : Αγκύρωση Άκρου Ελάσματος με Λωρίδα FRP [6]



Σχήμα 14 : Αγκύρωση με Κοχλίες [7]

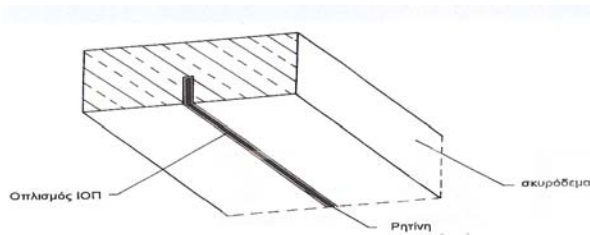
8. ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΟΥ ΜΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΕΛΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΑ ΣΕ ΑΥΛΑΚΙΑ

Εναλλακτική μέθοδος τοποθέτησης των χαλύβδινων ελασμάτων ή των ινοπλισμένων πολυμερών για την καμπτική ενίσχυση μιας δοκού είναι μέσα σε 'αυλάκια', εγχοπές, στη δοκό, στο εφελκυσμένο πέλμα της (Σχήμα 15, 16). Με αυτόν τον τρόπο ο οπλισμός ενίσχυσης είναι εσώκλειστος στο σκυροδέμα [10], γεγονός που προσδίδει στη μέθοδο κάποια πλεονεκτήματα έναντι της κλασσικής μεθόδου επικόλλησης των ελασμάτων στις δοκούς. Μειονεκτήματα παρόλα αυτά υπάρχουν.

Όταν λοιπόν ο πρόσθετος οπλισμός τοποθετείται σε εγχοπές υπάρχει καλύτερη συνάφεια μεταξύ αυτού και του σκυροδέματος. Επίσης, έτσι προστατεύεται ο οπλισμός καλύτερα από τη διάβρωση και από τη δράση διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων. Στα αρνητικά της μεθόδου θα μπορούσε να αναφερθεί το αυξημένο κόστος και τα αυξημένα εργατικά, καθώς μια τέτοια εργασία είναι σαφώς πιο απαιτητική από την επικόλληση των ελασμάτων. Τέλος, κατά τη διαδικασία αυτή υπάρχει το πρόβλημα περιορισμού λόγω του πάχους της επικάλυψης [14].



Σχήμα 15 : Τοποθέτηση οπλισμού [14]



Σχήμα 16: Οπλισμος σε 'αυλάκια' [16]

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενίσχυση μιας δοκού με επικολητά φύλλα από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή μπορεί να αυξήσει την καμπτική της αντοχή με την τοποθέτησή τους στο εφελκόμενο πέλμα της. Από τη μελέτη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των δύο μεθόδων ενίσχυσης, συμπεραίνουμε ότι η χρήση των FRP στη θέση των χαλύβδινων ελασμάτων υπερέχει όσον αφορά κυρίως στην ανθεκτικότητα τους στη διάβρωση και στην ευκολία εφαρμογής τους που προέρχεται από το χαμηλό βάρος τους και το μη περιορισμένο μήκος τους. Από την άλλη πλευρά όμως η συμπεριφορά τους σε υψηλές θερμοκρασίες και το κόστος τους, είναι αποτρεπτικοί παράγοντες, το κόστος ίσως όμως ισοσταθμίζεται με τα θετικά της μεθόδου. Έτσι λοιπόν για τη χρήση FRP στην ενίσχυση κατασκευών, καταλήξαμε στο συμπέρασμα, μετά από αξιολόγηση και των τριών τύπων FRP, ότι ο καταλληλότερος τύπος είναι τα ινοπλισμένα πολυμερή άνθρακα γιατί ικανοποιούν σε μεγαλύτερο βαθμό τις απαιτήσεις της ενίσχυσης. Όσον αφορά τους τρόπους αστοχίας των FRP, ο πιο συνήθης είναι η αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος στα άκρα του φύλλου ενίσχυσης. Οι περιοχές αυτές απόληξης είναι το αδύνατο σημείο και για τα επικολητά φύλλα χάλυβα, στα οποία επίσης αποκολλώνται τα άκρα. Τρόπος καθυστέρησης παρά αποφυγής της αστοχίας αυτής είναι η αγκύρωση των ελασμάτων, στα άκρα τους, με λωρίδες FRP ή χάλυβα ή με κοχλίες. Οι κοχλιωτές συνδέσεις δεν είναι κατάλληλες για δοκούς ενισχυμένες με FRP γιατί λόγω ασυνέχειας που προκαλούν, βοηθούν στη θραύση του ίδιου του υλικού ενίσχυσης. Το πρόβλημα αποκόλλησης των άκρων καθώς και αυτό της διάβρωσης μπορεί να αντιμετωπιστεί με εφαρμογή της εναλλακτικής μεθόδου τοποθέτησης των ελασμάτων μέσα σε ‘αυλάκια’. Παράγοντες όπως το πάχος του ελάσματος και η ποιότητα του συγκολλητικού υλικού πρέπει να λαμβάνονται επίσης υπόψη σε κάθε εφαρμογή.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δρίτσος Σ., “Ενισχύσεις / Επισκευές Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα”, Διαδικασίες – Τεχνικές και Διαστασιολόγηση, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2006.
- [2] Τριανταφύλλου Θ., “Ενισχύσεις Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά – Υπολογισμοί”, Δελτίο Συλλόγου Πολιτικών Μηχανικών, Νο. 275, 2000.
- [3] Τριανταφύλλου Θ., “Ενισχύσεις Κατασκευών Σκυροδέματος με Ινο-Οπλισμένα Πλαστικά Υλικά”, 11^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κέρκυρα 18-20 Μαΐου 1994.
- [4] D.Van Gemert, J.Dereymaeker, Σ.Κουντούρης, Δ.Πολυζωίδης, “Μέθοδος Διαστασιολόγησης Ενισχύσεως Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος με Χαλύβδινα Επικολητά Ελάσματα”, Πρακτικά 7^ο Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, Πάτρα 1985.
- [5] Κωνσταντίνος Σπυράκος, “Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά Φορτία”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2007.
- [6] Teng J.G., Chen J.F., Smith S.T., Lam L., “FRP Strengthened RC Structures”, John Wiley and Sons, Ltd, 2001.
- [7] Hollaway and Leeming, “Strengthening of Reinforced Concrete Structures using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering”, Woodhead Publishing Ltd, 1999.
- [8] Thanasis C. Triantafyllou, “Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites”, ACI Structural Journal, Vol.95, No.2, pp.107-115, March-April 1998.
- [9] U.Meier, “Strengthening of Structures Using Carbon Fibre/Epoxy Composites”, Construction and Building Materials, Vol.9, No.6, pp.341-351, 1995.
- [10] Oehlers D., Morgan J.P., “Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams”, J. Structural Eng., ASCE, Vol.116, No. 4, pp. 978-995, 1990.

- [11] S.Zhang, M.Raouf and L.A.Wood, "Prediction of Peeling Failure of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Steel Plates", Proc. Inst Civ. Engrs Structs and Bldgs, 110, pp. 257-268, Aug., 1995.
- [12] T.M.Roberts, H.Haji-Kazemi, "Theoretical Study of the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates", Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 87, pp.39-55, Mar., 1989.
- [13] Michael J.Charles, Theodore A.Thomson Jr, Ted F.Januszka and William W.Finch Jr., "Flexural Strengthening of Concrete Beams Using Externally Bonde Composite Materials", Construction and Building Materials, Vol.8, No.3, pp.191-201, 1994.
- [14] www.sml.civil.upatras.gr
- [15] <http://www.sika.gr/PDF/Carbodur.pdf>
- [16] eclass.upatras.gr, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Μάθημα 'Ενισχύσεις Επισκευές Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα', Σ.Η.Δρίτσος.